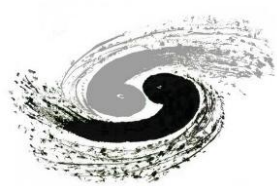


# “量能器优化”课题 总结报告

刘勇

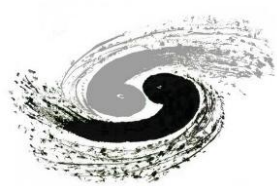
科学家工作室及卓越中心项目总结会

2022年2月15日



# 提纲

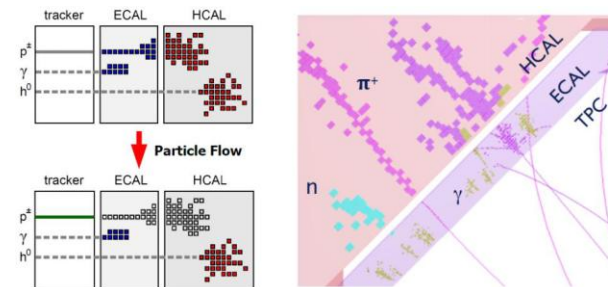
- 研究动机及方向
- 研究进展
  - 4D电磁量能器：晶体-SiPM性能研究，探测器及物理的性能研究及优化
  - 基于闪烁玻璃的强子量能器
- 研究成果及国际合作
- 经费使用情况
- 研究计划及经费需求



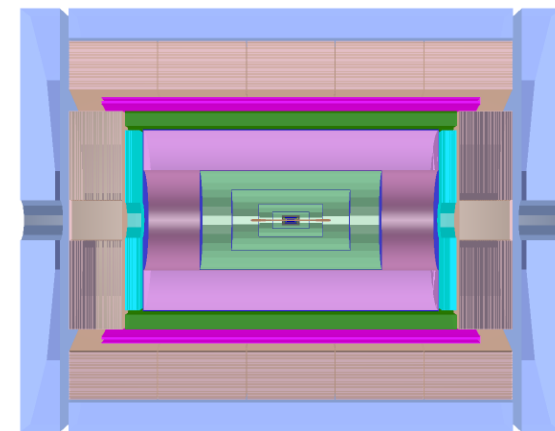
# 研究动机和方向

- 高粒度量能器技术
  - 未来高能正负电子对撞机实验要求：喷注能量分辨3-4%
- 电磁量能器：全新的技术方案 (2018年至今)
  - 电磁能量分辨：由CEPC-CDR基准方案 $\sim 16\%/\sqrt{E}$ 提升至 $\sim 3\%/\sqrt{E}$
  - 4D晶体量能器：高精度的三维位置分辨和时间分辨
- 强子量能器：全新的概念设计(2021年至今)
  - 显著提高能量取样比，改善强子能量分辨
  - 基于高密度的闪烁玻璃的PFA强子量能器
  - 与国内相关单位开展闪烁玻璃材料的合作研究

## PFA-oriented Calorimetry

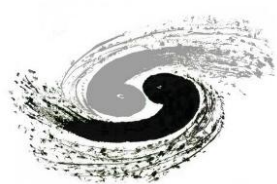


CEPC: the 4th Conceptual Detector Design



Calorimeters: crystal ECAL and ScintGlass HCAL

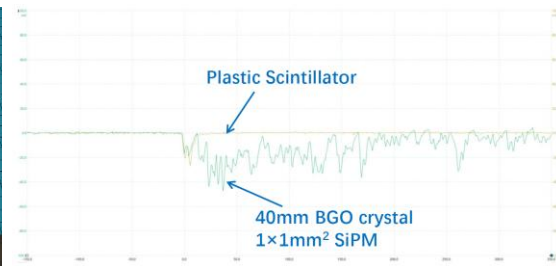
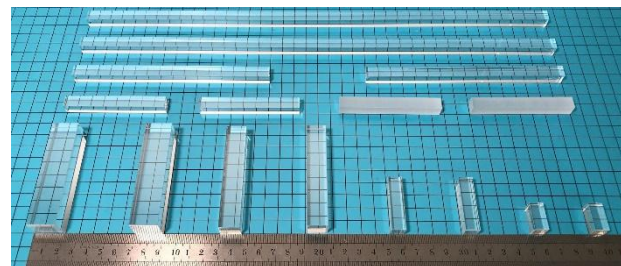
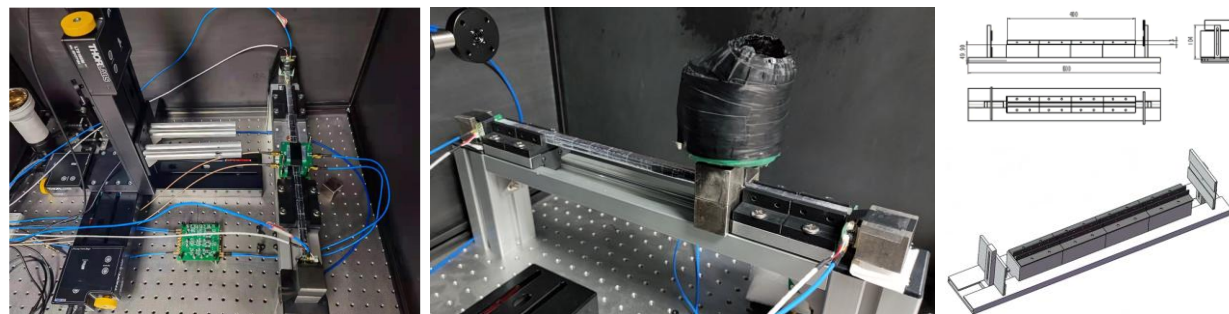
课题状态说明：2020年5月起课题调整为本人负责，此报告重点汇报这个时间段的研究进展和阶段成果



# 4D晶体量能器：晶体-SiPM探测单元

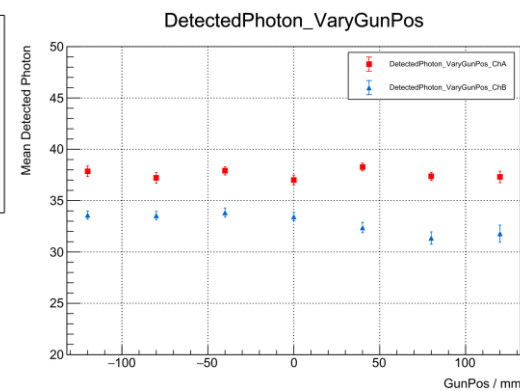
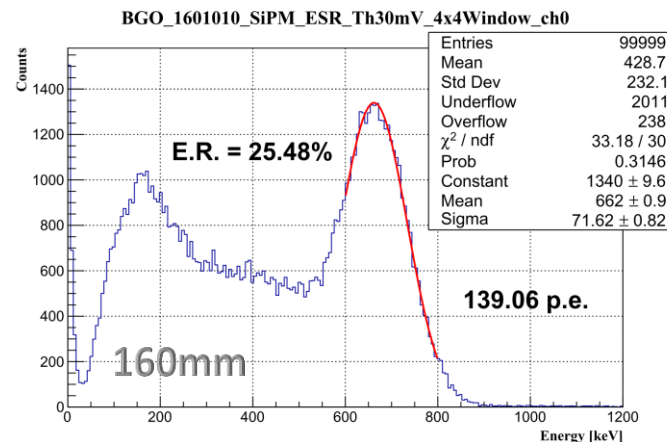
## 晶体-SiPM测试平台搭建

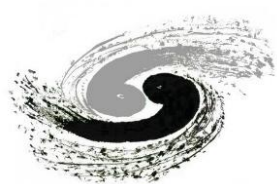
- 3D移动平台
- SiPM读出板及前置放大器
- 高速示波器：SiPM波形采样
- 皮秒激光器：SiPM单光电子刻度，时间特性研究
- 3D打印机：晶体及SiPM读出板的机械支撑结构



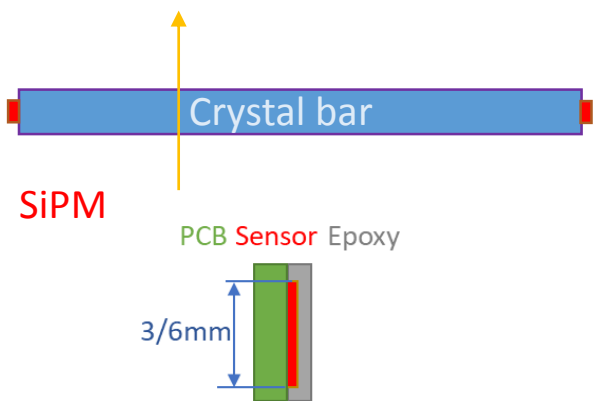
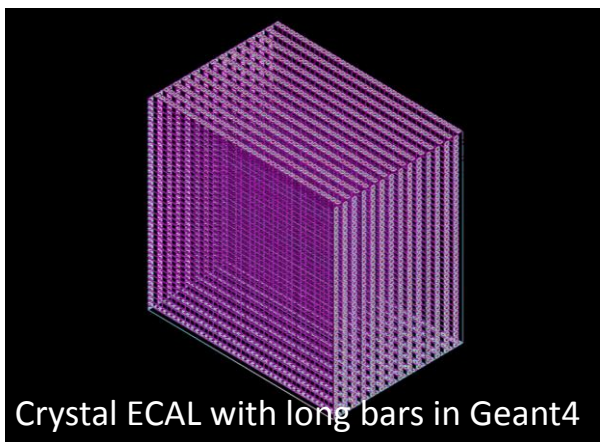
## 晶体-SiPM性能标定

- 利用放射源和宇宙线，对晶体性能标定
  - 能量分辨、响应均匀性、时间分辨等
  - 不同晶体长度、包装材料的影响
- 测量晶体的透光率/衰减长度
- 实验测量与模拟结果比较，验证并完善模拟





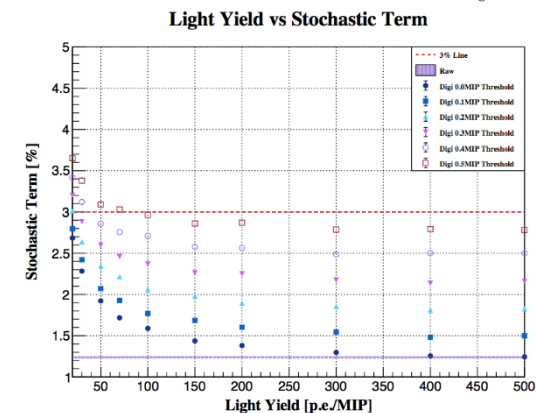
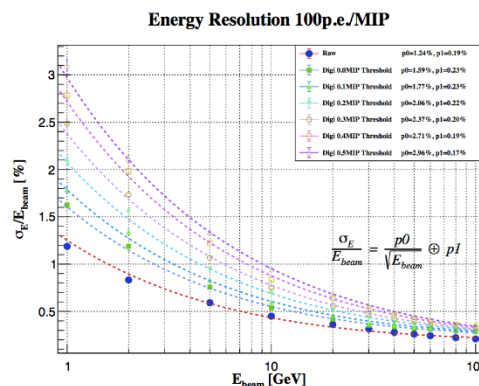
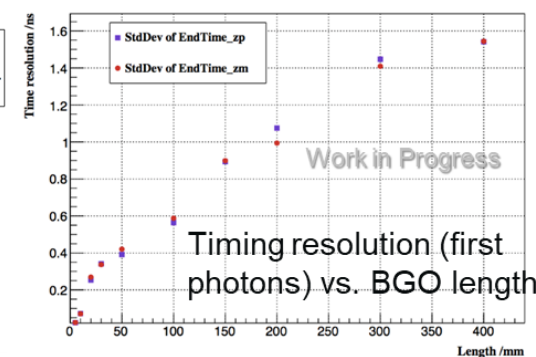
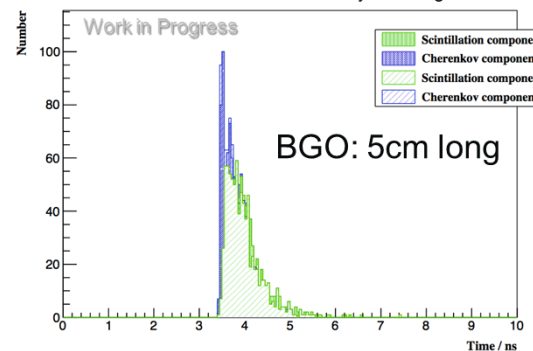
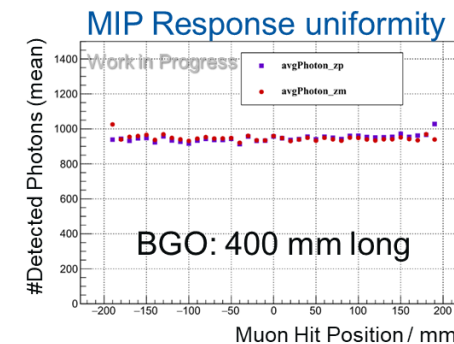
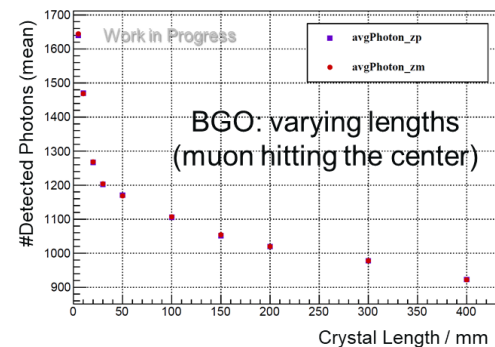
# 4D晶体量能器： Geant4模拟研究

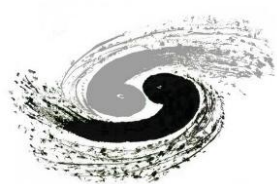


软件相关工作： 发展并完善两套基于Geant4的模拟工具

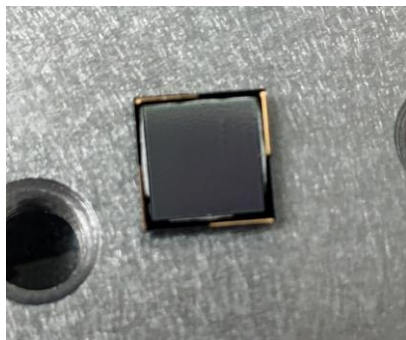
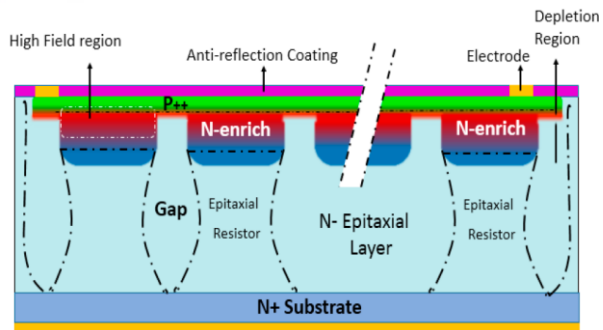
- 单根晶体的光学全模拟
  - 能量与时间分辨率，以及晶体各参数对性能的影响，并与实验测量进行比较
- 晶体电磁量能器+强子量能器的全模拟
  - 能量阈值、SiPM数字化模型
  - 强子在晶体量能器中的簇射过程

对探测单元设计、新重建算法发展提供参考依据





# 4D晶体量能器： SiPM及读出电子学研究

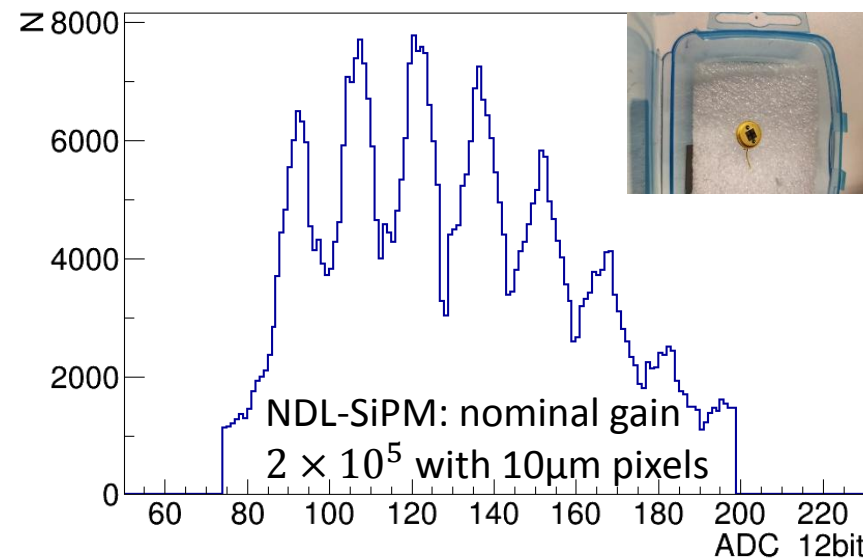


## 北师大NDL-SiPM性能研究

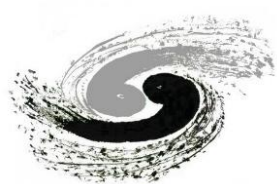
- NDL-SiPM创新点：高填充因子和高单元密度
- 优势：大动态范围，高探测效率
- 缺点：增益较低，噪声水平较高
- 对前端电子学的要求：高灵敏度、低噪声

## SiPM前端读出电子学合作研究(CALICE合作组)

- 德国海德堡大学开发的KLauS ASIC，针对芯片的BGA封装合作设计并生产读出测试板
- 高性噪比：已知唯一能对NDL-SiPM进行单光电子刻度的ASIC
- 连续工作(>500ns)，并具有大动态范围(~550pC)



Klaus芯片研究与JUNO-TAO团队合作开展

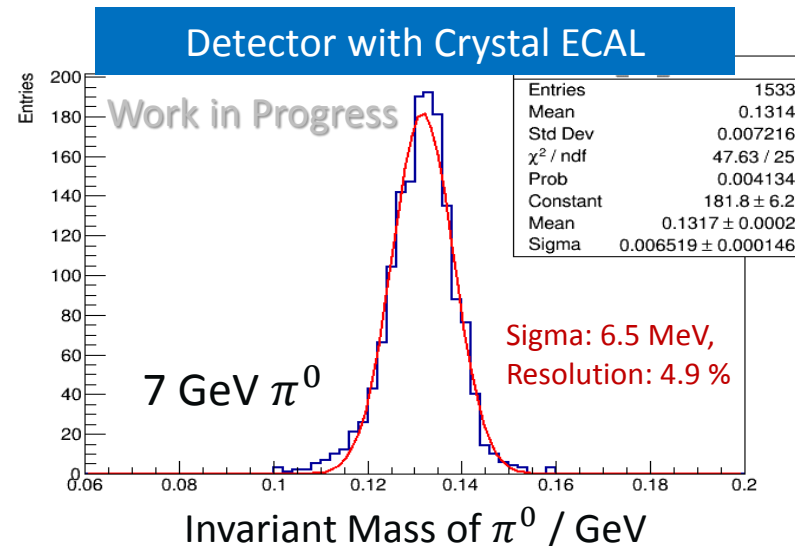


# 4D晶体量能器：物理性能研究

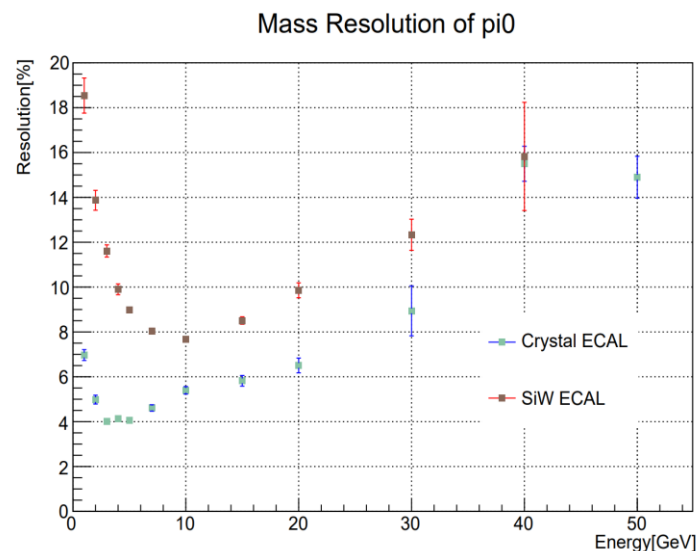
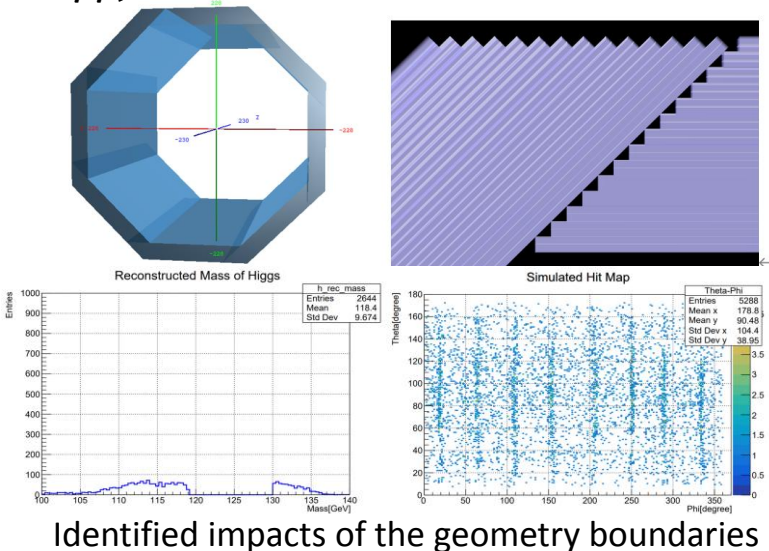
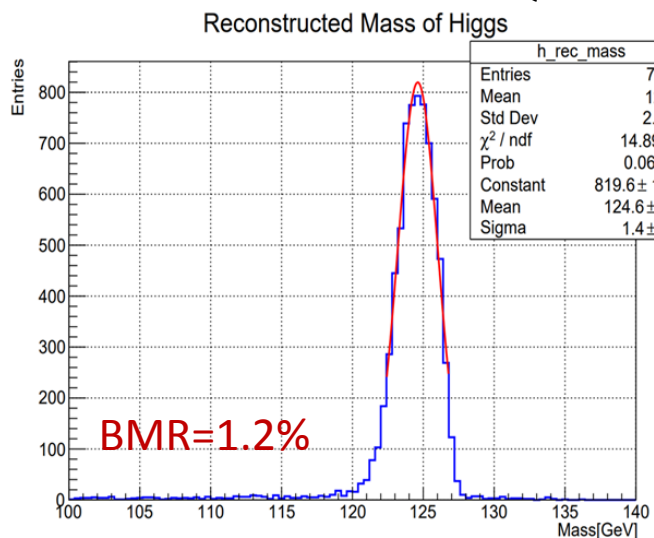
研究晶体量能器对CEPC上纯光子末态物理的性能

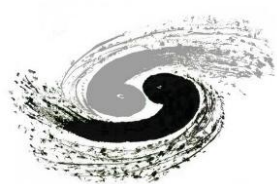
- $H \rightarrow \gamma\gamma$ : 侧重高能光子的能量分辨
- $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ : 兼顾光子的能量分辨及角度/位置分辨
- 量能器扇区的边界影响

4D晶体量能器在光子末态的探测上显示出巨大潜力



ZH( $Z \rightarrow \nu\nu, H \rightarrow \gamma\gamma$ ) at 240 GeV





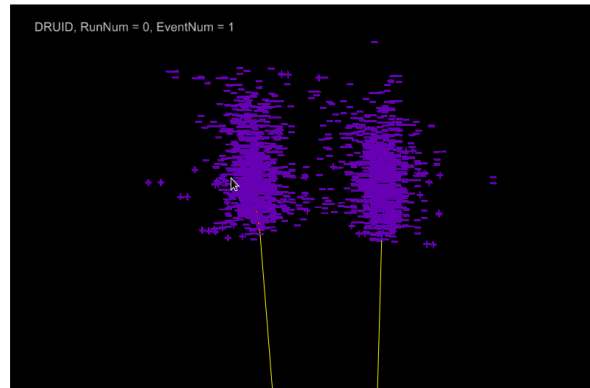
# 4D晶体量能器：物理性能研究

## 研究4D晶体量能器对CEPC上喷注(jets)的性能

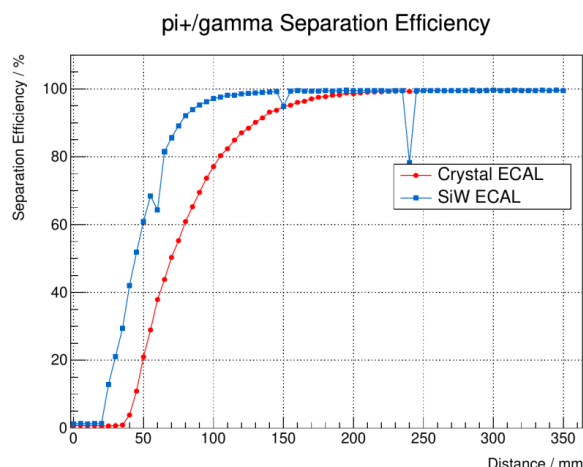
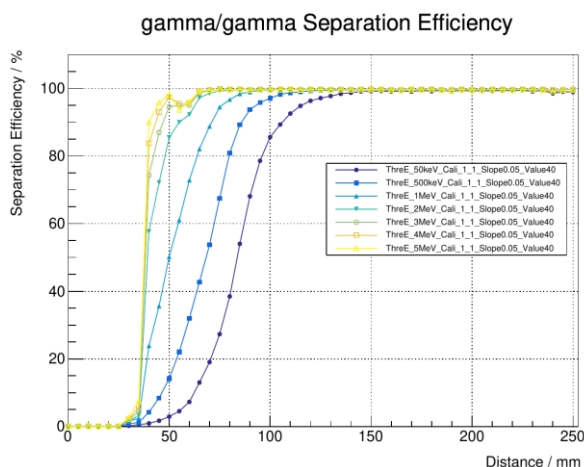
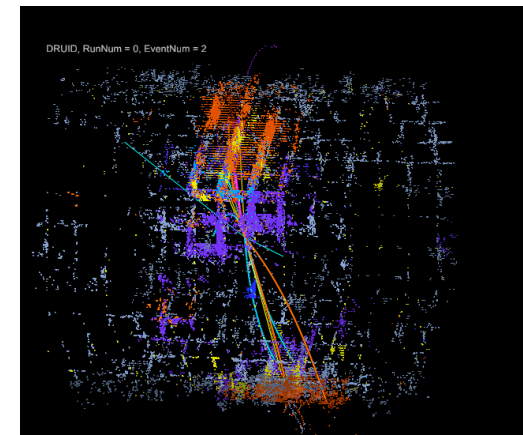
- 针对晶体量能器特性，优化粒子流算法(PFA)及参数
- 提高临近入射粒子的区分能力（光子及强子）
- 关键物理性能指标——玻色子质量分辨(BMR)得到显著改善

BMR由4.5%提升至3.7% (CEPC上要求BMR<4.0%)

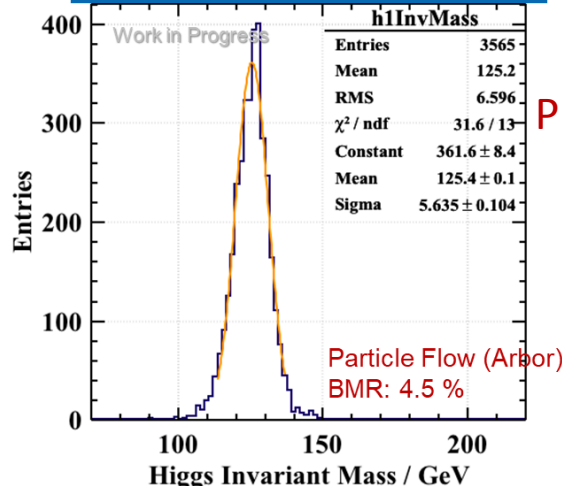
Two 5GeV photons



ZH(Z → vv, H → gg) at 240 GeV



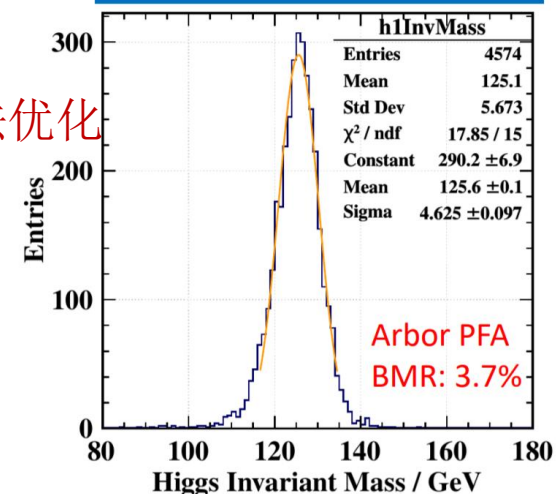
Detector with Crystal ECAL option



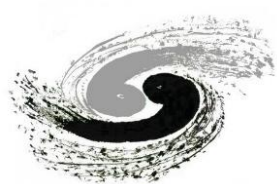
PFA算法优化



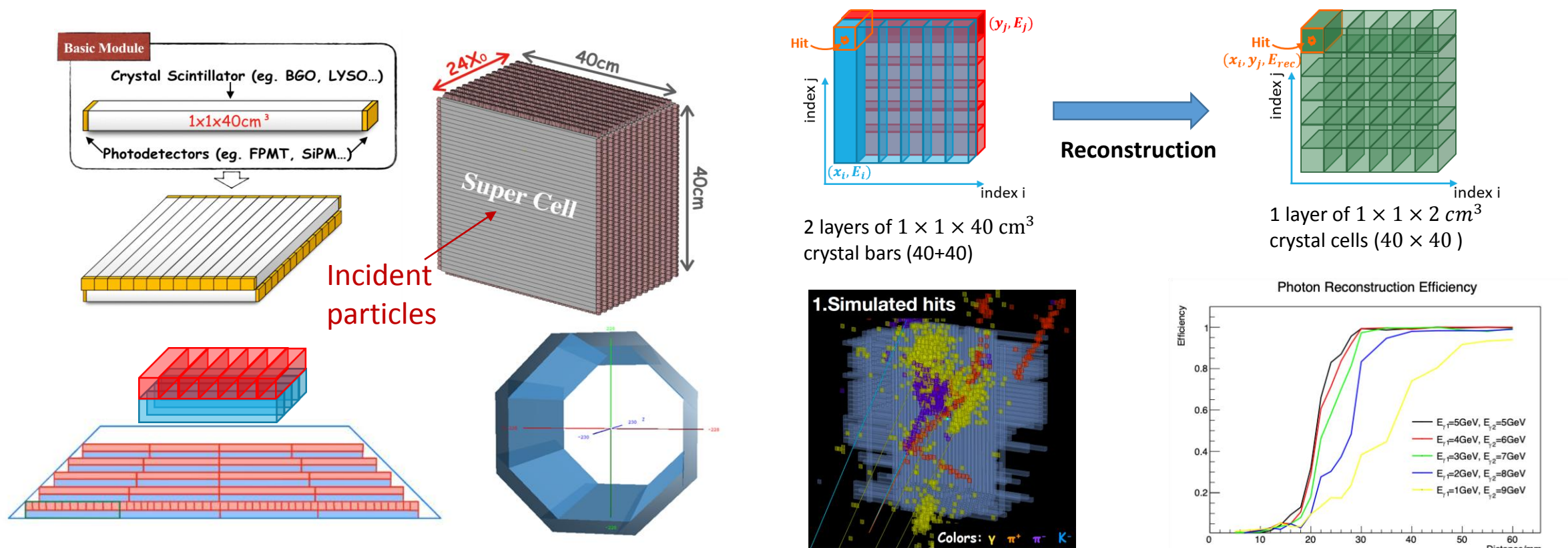
Detector with Crystal ECAL option



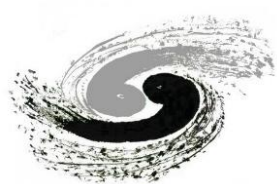




# 4D晶体量能器：全新的重建算法

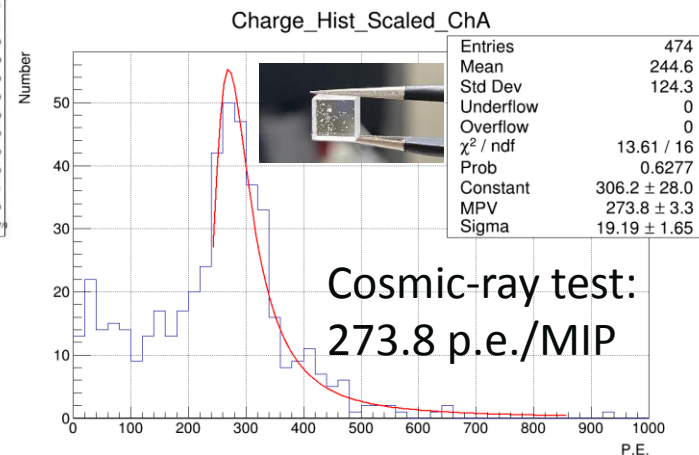
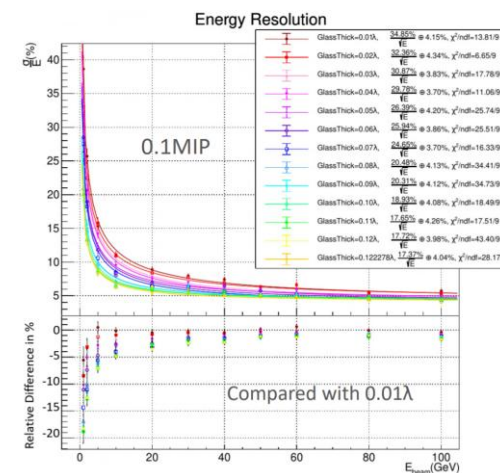
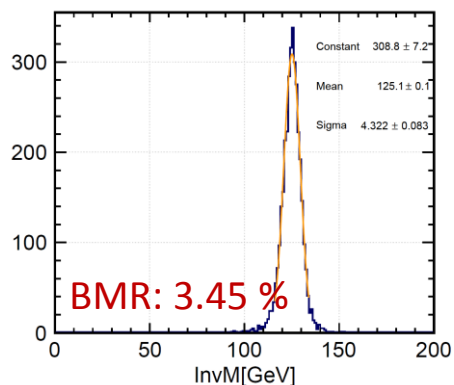
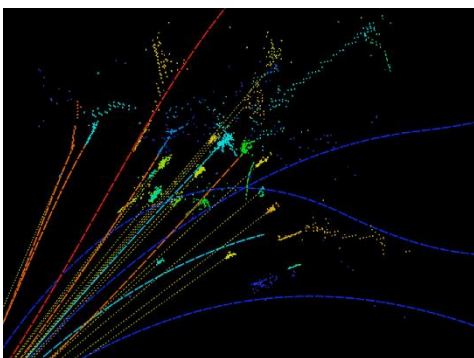
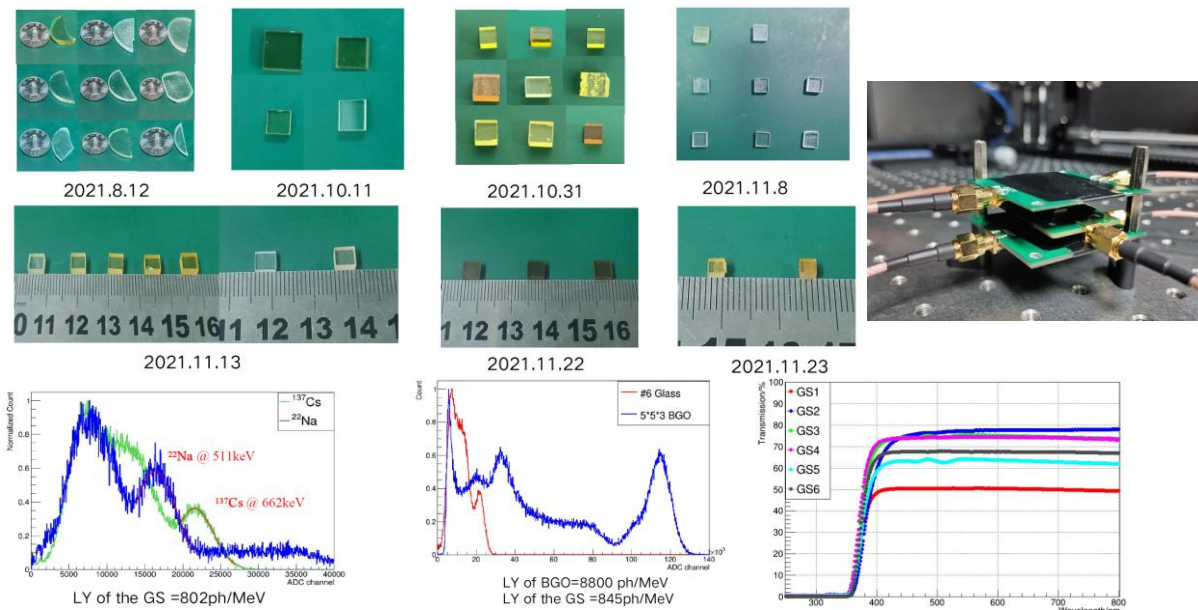


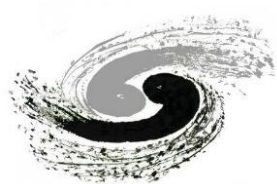
- 针对晶体长条量能器设计，发展全新的重建算法
  - 技术难点：提高临近粒子的空间分辨能力，并尽最大可能排除伪击中(ghost hits)带来的影响
  - 研究进展：对于单个及多个光子已取得较好性能，目前在针对强子簇射开展研究



# 新型高粒度强子量能器的预研：基于闪烁玻璃

- 利用高密度闪烁玻璃进一步提升能量分辨
- 已开展的预研工作：2020年5月至今
  - 闪烁玻璃材料：样品试制、性能表征
  - 探测器性能：单粒子的强子能量分辨
  - 物理性能：喷注（多粒子）的能量分辨
- 主要研究方向
  - 闪烁玻璃材料：密度>6g/cc, 光产额 1000~2000ph/MeV, 低成本
  - 强子量能器性能优化, 及对玻璃材料的需求

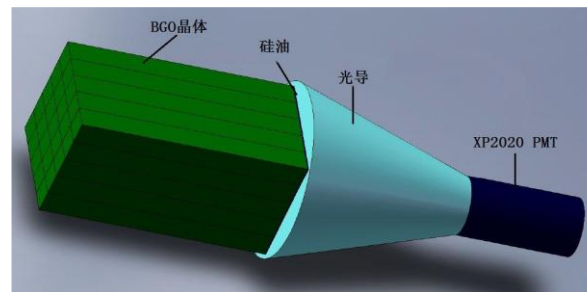




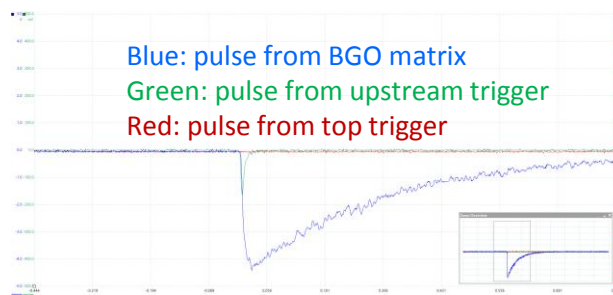
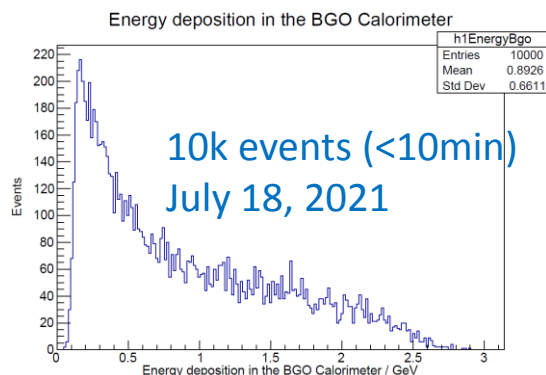
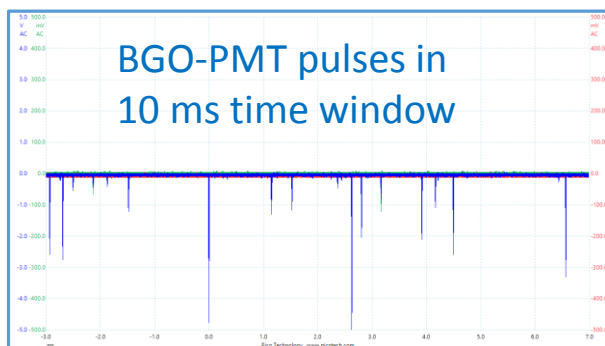
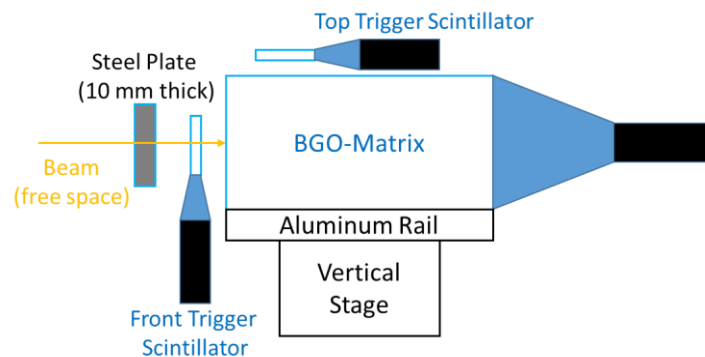
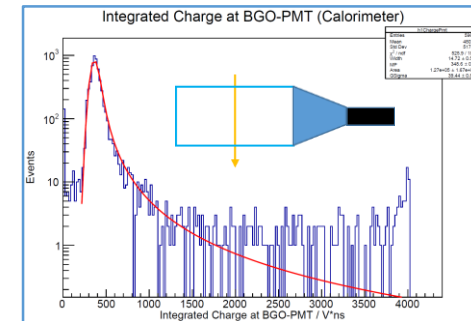
# BGO量能器和束流测试

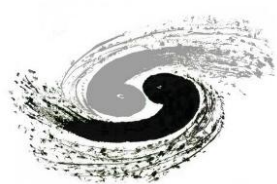
- 同步辐射站(BSRF-3W1): 高能粒子的能量标定
  - 利用10号厅已有的BGO量能器
- 研究目的
  - 受疫情影响无法出国完成束流实验, 探索在国内进行束流实验的其他可能性
  - 通过束流测量, 深入理解BGO晶体的响应特性
- 初步实验结论
  - 实测高能粒子能谱为0.2-2.5 GeV连续分布 (能谱标定的精度受限于宇宙线测试条件)
  - 高能粒子的事例率在数百Hz水平

### 10号厅量能器示意图



### 宇宙线MIP能量刻度





# 研究成果及国际合作

## 已发表文章

- [Yong Liu et al 2020 JINST 15 C04056](#)
- [J. Jiang et al 2021 JINST 16 T06003](#)

## 待发表文章

- Scintillating Glass Calorimetry, HKUST-IAS HEP2022 Whitepaper (International Journal of Modern Physics A; cross-review in Jun. 2022)

## 会议报告

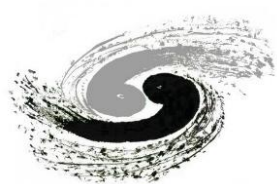
No.	报告题目	会议名称及时间
1	High-granularity Crystal Calorimeter: conceptual designs and first studies	Calorimetry for the High Energy Frontier (CHEF2019), Kyushu University, Fukuoka, Nov. 2019
2	High-granularity Crystal Calorimeter: R&D status	Mini-workshop on a detector concept with a crystal ECAL, Jul. 2020
3	High-granularity Crystal Calorimeter	CALICE Collaboration Meeting, Sep. 2020
4	4D Crystal Calorimeter Status	International CEPC Workshop, Shanghai, Oct. 2020
5	Crystal Calorimeter for CEPC: R&D status	4th FCC Physics and Experiments workshop, FCC Week, Nov. 2020
6	Overview of High-granularity Crystal Calorimeter	HKUST IAS High Energy Physics Conference, Jan. 2021
7	High-granularity Crystal Calorimeter	CALICE Collaboration Meeting, Mar. 2021
8	High-granularity Crystal Calorimeter: R&D status	CEPC Joint Workshop at Yangzhou, Apr. 2021
9	Overview of Scintillator-based Calorimeters for Future Lepton Collider Experiments	快闪烁材料研讨会, 2021年5月
10	High-granularity Crystal Calorimeter: R&D Status and Highlights	CALICE Collaboration Meeting, Sep. 2021
11	Scintillating Glass Calorimetry	HKUST IAS High Energy Physics Conference/Mini-Workshop, Jan. 2022

## 计划中的文章: technical papers

- Crystal-SiPM studies: preparing final results
- Scintillating glass HCAL: in drafts

## 国际合作

- CALICE合作组: 高粒度量能器
  - US Snowmass战略规划研讨
- 提交LOI: [High-Granularity Crystal Calorimetry Letter of Intent](#)

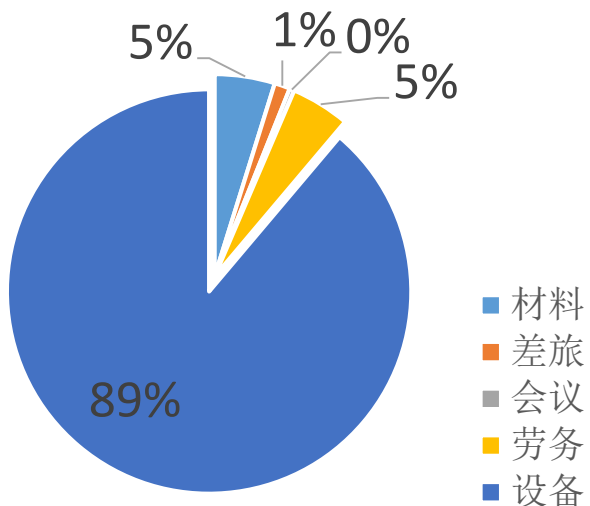


# 经费预算及执行

## 经费情况

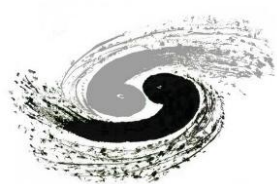
- 总额预算：400万元，到位300万元
- 2020年11月至今：共执行148.3万，主要用于购买晶体-SiPM测试相关的仪器设备
- 可用经费共151.7万元

2020年11月至今的经费执行



科目名称	预算金额	执行金额	冻结金额
合计	400	127.024312	21.2858
设备费	240	112.613742	0
购置设备费	240	112.613742	0
材料费	40	5.601765	11.944
测试化验加工费	10	0	8
差旅费	41	1.5859	0
会议费	12	0.175	0.035
国际合作与交流费	20	0	0
出版/文献/信息传播/知识产权事务费	0	0.02736	0
人员劳务费	16	7.020545	1.3068
其他费	21	0	0

注：晶体-SiPM相关的仪器设备同时也得到了人才项目支持



# 未来研究计划

课题经费：到位300万元，结余151.7万元

科目名称	预算金额	执行金额	冻结金额
合计	400	127.024312	21.2858
设备费	240	112.613742	0
购置设备费	240	112.613742	0
材料费	40	5.601765	11.944
测试化验加工费	10	0	8
差旅费	41	1.5859	0
会议费	12	0.175	0.035
国际合作与交流费	20	0	0
出版/文献/信息传播/知识产权事务费	0	0.02736	0
人员劳务费	16	7.020545	1.3068
其他费	21	0	0

## 下一步需要的研究内容建议

- 4D晶体电磁量能器
  - 小型晶体阵列的探测模块：建造，标定，束流测试
  - SiPM读出电子学与探测器前端的联合测试: Klaus芯片（国际合作），PIST芯片（由所创新支持研制）
  - 模拟研究及重建算法，粒子流算法及性能优化
- 闪烁玻璃的强子量能器
  - 玻璃样品的性能标定，强子量能器读出模块
  - 强子量能器的模拟研究及性能优化

未来研究的经费需求：共约160万元

- 小规模晶体阵列: ~60万元
- SiPM器件及读出电子学: ~30万元
- 强子量能器读出模块: ~30万元
- 差旅及束流测试(CERN, DESY): ~40万元